

О.В. Коломійцев<sup>1</sup>, О.О. Болюбаш<sup>1</sup>, Д.Г. Васильєв<sup>1</sup>, А.В. Губа<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

<sup>2</sup> Харківське ПТЗ – НКА України, Харків

## КАНАЛ АВТОМАТИЧНОГО СУПРОВОДЖЕННЯ КОСМІЧНОГО АПАРАТУ ЗА НАПРЯМКОМ ДЛЯ ЛІВС З ВИКОРИСТАННЯМ МЧЧМВ ТА МОЖЛИВІСТЮ РОЗПІЗНАВАННЯ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

Запропоновано канал автоматичного супроводження космічного апарату (КА) за напрямком (АСН) для лазерної інформаційно-виміральної системи (ЛІВС) з використанням модернізованого частотно-часового методу вимірювання (МЧЧМВ) та прямих вимірів кутової швидкості КА. Це дозволяє забезпечити як пошук КА у заданій точки простору, так і його розпізнавання, інформаційний зв'язок з КА, а також високу стійкість каналу АСН щодо зриву автосупроводження КА завдяки застосування вузькосмугової фільтрації. Розкрито сутність роботи каналу АСН, що пропонується. Представлені отримані аналітичні вирази для розрахунків.

**Ключові слова:** канал автоматичного супроводження літальних апаратів за напрямком.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Існуючі канали і системи АСН, які використовують лазерне випромінювання, що знаходяться в експлуатації, не повною мірою задовольняють усе зростаючим до них вимогам. Це є наслідком того, що вони мають ряд істотних недоліків, основними з яких є невелика функціональність та недостатня стійкість автосупроводження КА. Тому проблема синтезу каналу АСН з МЧЧМВ із розширеними можливостями та забезпеченням стійкого кутового автосупроводження КА в структурі ЛІВС є актуальною [1].

**Аналіз останніх публікацій.** Аналіз публікацій по існуючим зразкам лазерних систем [2] показує, що їх недоліками є неоперативність супроводження космічних апаратів та погана боротьба з флюктуаційними і динамічними похибками.

**Метою статті** є представлення результатів розробки наукових і науково-технічних пропозицій щодо створення каналу АСН із розширеними можливостями та використанням вузькосмугової фільтрації і МЧЧМВ [3].

### Виклад основного матеріалу

Розширити функціональність каналу АСН можливо завдяки додаткового використання прямих вимірів від каналу вимірювання кутових швидкостей (прискорення) та сканування сумарною діаграмою спрямованості (ДС) лазерного випромінювання ЛІВС у заданій області із заданим законом сканування. Тому, що відомі параметри сигналу, а що інформацію можливо використовувати при розробці методів розпізнавання КА.

Робота запропонованого каналу АСН для ЛІВС з можливістю пошуку та розпізнавання ЛА полягає в наступному (рис. 1).

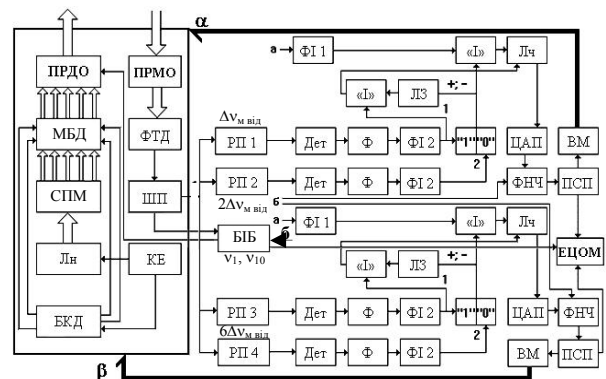


Рис. 1. Структурна схема каналу АСН

Із синхронізованого одномодового багаточастотного спектра випромінювання YAG:Nd<sup>3+</sup> – лазера (або лазера з найбільш кращими показниками) (Лн) за допомогою селектору подовжніх мод (СПМ) [4] виділяються необхідні пари частот і окремі частоти для створення:

– рівносигнального напрямку (РСН) на основі формування сумарної ДС лазерного випромінювання, завдяки частково перетинаючихся 4-х парціальних діаграм спрямованості, за умовою використання комбінацій подовжніх мод («підфарбованих» різницевими частотами міжмодових биттів)

$$\Delta v_{54} = v_5 - v_4 = \Delta v_M, \quad \Delta v_{97} = v_9 - v_7 = 2\Delta v_M,$$

$$\Delta v_{63} = v_6 - v_3 = 3\Delta v_M, \quad \Delta v_{82} = v_8 - v_2 = 6\Delta v_M;$$

– інформаційного каналу зв'язку, за умови використання сигналу на несучих частотах  $v_1$  і  $v_{10}$ .

Сигнал несучих частот  $v_1$  і  $v_{10}$ , минаючи модифікований блок дефлекторів (МБД), потрапляє на передаючу оптику (ПРДО), де змішується (модулюється) з інформаційним сигналом від багатофункціонального інформаційного блоку (БІБ) та формує інформаційний сигнал, що передається на КА.

Водночас, сигнал частот міжмодових биттів  $\Delta v_m$ ,  $2\Delta v_m$ ,  $3\Delta v_m$  та  $6\Delta v_m$  потрапляє на МБД, який створений з 4-х п'єзоелектричних дефлекторів. Парціальні ДС лазерного випромінювання попарно зустрічно сканують МБД у кожній із двох ортогональних площин (рис. 1, 2). Період сканування задається блоком керування дефлекторів (БКД), який разом з лазером з накачкою (Лн) живляться від керуючого елемента (КЕ). Проходячи через ПРДО, груповий лазерний імпульсний сигнал пар частот:  $v_5, v_4 = \Delta v_m$ ,  $v_9, v_7 = 2\Delta v_m$ ,  $v_6, v_3 = 3\Delta v_m$  та  $v_8, v_2 = 6\Delta v_m$  фокусується в точки простору, що скануються, оскільки здійснюється зустрічне сканування двома парами ДС лазерного випромінювання у кожній із двох ортогональних площин  $\alpha$  і  $\beta$  або X і Y, при цьому несучі частоти  $v_1$  і  $v_{10}$  – проходять вдовж РСН (рис. 2).

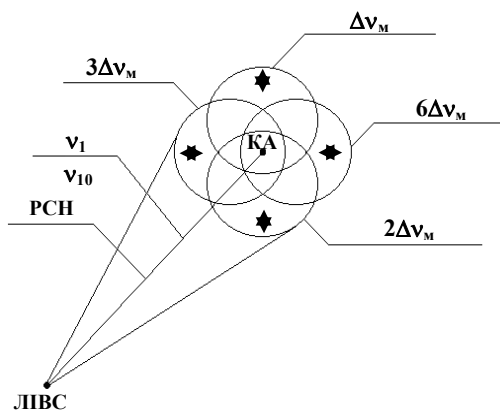


Рис. 2. Формування РСН та сканування сумарною ДС лазерного випромінювання

Прийняті прийомною оптикою (ПРМО) від КА інформаційні та відбиті в процесі сканування чотирьох ДС лазерні імпульсні сигнали і огинаючі сигнали ДС лазерного випромінювання за допомогою фотодетектора (ФТД) перетворюються в електричні імпульсні сигнали на несучій частоті і різницеви частотах міжмодових биттів. Підсилені широкосмуговим підсилювачем (ШП) вони розподіляються:

- в БІБ для обробки інформації, що приймається від КА;

- по резонансних підсилювачах (РП), які настроєні на відповідні частоти:  $\Delta v_m$ ,  $2\Delta v_m$ ,  $3\Delta v_m$ ,  $6\Delta v_m$ .

При цьому імпульсні сигнали радіочастоти, що надходять з РП $\Delta v_m$  від і РП $2\Delta v_m$  від – формують сигнал похибки по куту  $\alpha$ , а РП $3\Delta v_m$  від і РП $6\Delta v_m$  від – по куту  $\beta$ .

Формування сигналу похибки по куту  $\alpha$  полягає в наступному. Введення імпульсного сигналу (а) з опорного каналу  $\Delta v_m$ , перетвореного ФІ1 у «пачки» опорних імпульсів на частоті  $\Delta v_m$  оп, надходить на схему «І». Виділений і посилений імпульсний сигнал з РП $\Delta v_m$  від частоти міжмодових биттів  $\Delta v_m$  від детектується детектором (Дет) у виді огинаючої сигналу, що змінюється за законом руху ДС лазерного

випромінювання і, після проходження фільтру (Ф), перетворюється у формувачі імпульсів 2 (ФІ2) у точках переходів періодів сканування в імпульси (один імпульс за період сканування) та надходить на тригер «1», перекидаючи його. У цей же час, виділений і посилений РП $2\Delta v_m$  від імпульсний сигнал частоти міжмодових биттів  $2\Delta v_m$  від детектується, виділяючи огинаючу сигналу, що змінюється за таким же законом і, проходячи Ф, перетворюються у ФІ2 у точках переходів періодів коливань в імпульси (один імпульс за період сканування) та надходить на тригер «0», встановлюючи його у вихідний стан.

Задача виміру часового інтервалу в схемі «І» із заданою точністю полягає у встановленні критерію початку і кінця відліку часового інтервалу по визначених характеристиках значення імпульсних сигналів, що надходять на входи схеми «І». У зв'язку з тим, що передній фронт імпульсу досить малий у порівнянні з дозволом, що вимагається за часом, характерними значеннями сигналу, що визначають начало і кінець відліку часового інтервалу, є граничне значення  $U_n$  (порогове значення напруги).

Завдяки періодичному за цикл сканування відкриттю і закриттю тригером схеми «І», регулюється проходження імпульсів у схемі «І» від ФІ1, тобто відбувається виділення «пачок» імпульсів, число яких пропорційно куту відхилення КА від РСН. Підраховані лічильником імпульси перетворюються цифроаналоговим перетворювачем (ЦАП) в аналоговий сигнал похибки з необхідним знаком, що змішується у фільтрі нижніх частот (ФНЧ) з імпульсним сигналом від каналу кутових швидкостей КА (б) для уточнення похибки збігу по кутах. Завдяки обліку вимірювальної інформації від каналу кутових швидкостей (б) у ФНЧ усуваються динамічна і флуктуаційна похибки фільтрації. Отриманий сигнал відфільтрований у ФНЧ і посилений підсилювачем сигналу похибки (ПСП) відпрацьовується за допомогою виконавчого механізму ( $\alpha$ ) (ВМ $_{\alpha}$ ), надходить від ПСП $_{\alpha}$  на вхід електронно-обчислювальної машини (ЕЦОМ) та виділяється в ній у вигляді числа, пропорційного вимірюваному куту азимута  $\alpha$ .

Якщо КА знаходиться вище РСН, то на схему «І» першим надходить імпульс з ФІ2 міжмодової частоти  $\Delta v_m$  від, а на тригер надходить другим імпульс з ФІ2 міжмодової частоти  $2\Delta v_m$  від. На схему «І» від тригера подається строб, тривалість якого пропорційна відхиленню КА від РСН. Цей часовий інтервал вимірюється методом рахунка імпульсів частоти міжмодових биттів  $\Delta v_m$ . Оскільки тривалість строба залежить лише від величини відхилення КА від РСН, а не від сторони відхилення, маємо відповідну схему визначення полярності сигналу похибки («+» або «-»).

Якщо КА буде розташований нижче РСН, то першим надійде імпульс від ФІ2 з каналу  $2\Delta v_m$  від, а другим – з каналу  $\Delta v_m$  від.

Визначення знаку «+» або «-», або сторони відхилення КА від РСН складається в наступному.

Якщо КА знаходиться вище РСН, то імпульс 1 від каналу  $\Delta v_m$  від випереджає імпульс 2 каналу  $2\Delta v_m$  від. Оскільки строб від тригера затримується на час, що перевищує тривалість імпульсу 1 (або 2), то схема збігів «I» не спрацює, тому що імпульс 1 не збіжиться в часі з даним стробом. Знак сигналу похибки по куту  $\alpha$  залишається позитивним («+»).

Якщо КА знаходиться нижче РСН, то імпульс 1 відстає від імпульсу 2, тому він збігається в часі зі стробом. Схема «I» спрацює і змінює знак («-» або полярність) напруги сигналу похибки по куту  $\alpha$ . Імпульс зі схеми «I» подається на знаковий розряд лічильника (Лч) імпульсів з частотою  $\Delta v_m$ . Число імпульсів у лічильнику пропорційно куту відхилення  $\alpha$  від РСН.

Форматування сигналу похибки по куту  $\beta$  відбувається таким же чином, як для сигналу похибки по куту  $\alpha$ . Виконавчі механізми  $ВМ_\alpha$  і  $ВМ_\beta$  розвертають приймально-передаючу платформу таким чином, щоб КА знаходився на РСН каналу АСН, тобто на РСН сумарної ДС лазерного випромінювання.

Відображення інформації, що приймається (передається) від КА та обробка (вимірювання) кутів азимута  $\alpha$  і міста  $\beta$  відбувається в ЕЦОМ.

Вимірювальна інформація про тангенціальну складову швидкості (кутові швидкості) КА від каналу кутових швидкостей використовується в ББ для розпізнавання КА, за яким ведеться стеження.

В разі необхідності виявлення КА у заданій точці простору груповий сигнал, складений із частот міжмодових биттів, сканується у вигляді сумарної ДС лазерного випромінювання за допомогою модифікованого блоку дефлекторів, де кут та напрямок відхилення сумарної ДС задається БКД.

Підвищити стійкість (астатизм) каналу АСН відносно зриву автосупроводження КА можливо завдяки використанню низькочастотної фільтрації сигналів, що приймаються каналом. При наявності шумових фотонів та флуктуаційних шумів в каналі АСН актуальною є задача оптимальної фільтрації слабких сигналів. Кутове відхилення КА  $\theta$  від РСН вимірюється МЧЧМВ, при цьому зсуваються в часі періоди огинаючих пачок імпульсів у формі частот міжмодових биттів (за один повний прохід ДС лазерного випромінювання у прямому і зворотному напрямку сканування) щодо аналогічних періодів огинаючих у зустрічному напрямку. Тому оцінюємо точність визначення зсувів зазначених періодів при наявності фонових шумів ФТД. Без обліку фонових шумів точність таких вимірів буде визначатися помилкою дискретності. Якщо канал АСН використовувати для роботи на дальностях понад тисячі кілометрів, коли сигнал лише несуттєво перевищує фоновий шум ФТД, то дисперсія  $\sigma_{\Delta T}^2$  помилки зрушення огинаючих  $\Delta T$  залежить від шумів, від крути-

зни фронтів огинаючих, тобто від швидкості сканування  $k$ , або від відношення сигнал/шум  $q$ :

$$\sigma_{\Delta T}^2 = \frac{e}{2q} \cdot \left( \frac{2\Delta\theta_x}{k} \right)^2 = 2e \cdot \frac{\Delta\theta_x^2}{q \cdot k^2}, \quad (1)$$

де  $\Delta\theta_x$  – ширина ДС.

Тоді середньоквадратична похибка (СКП) кутового відхилення КА від РСН дорівнює

$$\sigma_\theta^2 = \frac{\dot{a}}{8} \cdot \frac{\Delta\theta_x^2}{q}. \quad (2)$$

Супроводження КА без пророкування його майбутнього положення не завжди буде високоточним (через наявність динамічних помилок). З формул (1) і (2) можливо побачити, що істотний вплив на стійкість автосупроводження КА, особливо на великих дальностях, робить відношення сигнал/шум та ширина ДС. Збільшити відношення сигнал/шум можливо завдяки усуненню шумів ФТД. За рахунок звуження смуги пропускання ФТД та використання статистичних особливостей сигналу. Відома фільтрація випадкових процесів (сигналів) [5] пропонується на підставі рішення не інтегральних, а диференціальних рівнянь із заданими початковими умовами, тобто на основі методу Калмана-Бьюсі. Застосування МЧЧМВ дозволяє, використовуючи результати вимірювання кутової швидкості у каналі АСН, практично виключити динамічну помилку та підвищить відношення сигнал/шум [6].

Запишемо диференціальне рівняння для оцінки сигналу модернізованого фільтра Калмана-Бьюсі

$$\frac{d\hat{\theta}_p(t)}{dt} = a(t)\hat{\theta}(t) + \hat{\theta}_{i\dot{a}} + b(t)[(y(t) - \delta\hat{\theta}) - \hat{\theta}(t)], \quad (3)$$

де результуюча усереднена оцінка похідної кутового сигналу  $\hat{\theta}_p$ :

$$\hat{\theta}_p = \frac{\sigma_{\hat{E}-\dot{A}}^{-2}}{\sigma_p^{-2}} \cdot \hat{\theta}_{\hat{E}-\dot{A}} + \frac{\sigma_{i\dot{a}}^{-2}}{\sigma_p^{-2}} \cdot \hat{\theta}_{i\dot{a}}, \quad (4)$$

$$\sigma_p^{-2} = \sigma_{\hat{E}-\dot{A}}^{-2} + \sigma_{i\dot{a}}^{-2} - \text{результуюча точність, зво-}$$

ротна дисперсії помилки;  $\hat{\theta}_{\hat{E}-\dot{A}}$  – оцінка кутової швидкості фільтра Калмана-Бьюсі;  $\hat{\theta}_{i\dot{a}}$  – оцінка прямих вимірів кутової швидкості КА.

Вираз (4) для розрахунку зваженої оцінки кутової швидкості дозволяє відслідковувати динаміку зміни результуючої дисперсії помилки в залежності від сигналу та шуму.

Розглянемо вплив руху КА на стійкість процесу кутового автосупроводження при використанні МЧЧМВ. Кутове відхилення КА від РСН пропорційно різниці півперіодів огинаючих руху ДС лазерного випромінювання. Ця різниця вимірюється з точністю визначення положення двох фронтів огинаючих (4). При цьому положення фронтів залежить не тільки від відхилення КА від РСН, але й від шумів ФТД і шумів активних елементів. Наявність за-

гальної сумарної помилки, складеної із сумарної помилки оцінки сигналу і згладжених фонових шумів ФТД, та динамічної помилки

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_p^2 + \sigma_a^2 = \frac{(G'_0)^2}{2(b-a)} \cdot (\sigma_S^2 \cdot a + N_0 \cdot b^2) + \frac{\sigma_{\theta_x}^2}{a^2}, \quad (5)$$

може привести до зриву автосупроводження КА за рахунок уникнення сигналу, або за рахунок неоднозначності вимірів, якщо ця помилка перебільшить половину ДС ( $\Delta\theta_x/2$ ) лазерного випромінювання в будь-якій з ортогональних площин. При цьому  $\sigma_p^2$  – сумарна помилка фільтрації сигналу та шуму, тобто сума дисперсій сигналу і згладженого шуму на вході;  $\sigma_a^2$  – динамічна помилка фільтрації;  $G'_0$  – крутість або чутливість вимірника  $\theta$  МЧМВ;  $N_0$  – спектральна щільність шуму на вході фільтру;  $\sigma_{\theta_x}^2$  – дисперсія помилки кутової швидкості ЛА.

У реальних каналах енергетична надмірність дозволяє сигналу істотно придушити флуктуаційні помилки. Тому на перший план виходять апаратні помилки, систематичні та випадкові, зумовлені стабільністю форми ДС лазерного випромінювання, точністю закону сканування променів  $\omega_{ск}$ , синхронізацією сканування, законами нечутливості активних електронних приладів, механічними люфтами, точністю юстировки, точністю датчиків кутових положень і тощо. Однак у каналі АСН сумарна СКП  $\sigma_{\Sigma\delta}$  за рахунок зазначених чинників може бути на два-три порядки менша ніж ширина ДС:

$$\sigma_{\Sigma\delta} \leq 10^{-3} \cdot \omega_{с\delta} = 0,6 \cdot 10^{-4} \left( \frac{\Delta\theta_x}{\dot{n}} \right).$$

При визначених умовах, це свідчить про високу стійкість автосупроводження каналу АСН щодо зриву за умови використання інформації про кутову швидкість КА.

#### КАНАЛ АВТОМАТИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПО НАПРАВЛЕНИЮ ДЛЯ ЛИИС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЧВМИ И ВОЗМОЖНОСТЬЮ РАСПОЗНАВАНИЯ КА

А.В. Коломийцев, А.А. Болюбаш, Д.Г. Васильев, А.В. Губа

*Предложен канал автоматического сопровождения космического аппарата (КА) по направлению (АСН) для лазерной информационно-измерительной системы (ЛИИС) с использованием модернизированного частотно-временного метода измерений (МЧВМИ) и прямых измерений угловой скорости КА. Это позволяет обеспечить как поиск КА в заданной точке пространства, так и его распознавание, информационную связь с КА, а также высокую устойчивость канала АСН относительно срыва автосопровождения КА благодаря применению узкополосной фильтрации. Раскрыта сущность работы предлагаемого канала АСН. Представлены полученные аналитические выражения для расчетов.*

**Ключевые слова:** канал автоматического сопровождения летательных аппаратов по направлению.

#### CHANNEL OF AUTOMATIC TRACKING OF SPACE VEHICLE TO DIRECTION FOR LIMS WITH THE USE OF MFTMM AND BY POSSIBILITY OF RECOGNITION SV

O.V. Kolomitsev, O.O. Boljubash, D.G. Vasilev, A.V. Guba

*The channel of the automatic tracking of space vehicle (SV) is offered to direction (AAOD) for the laser informatively-measuring system (LIMS) with the use of the modernized frequency-temporal method of measuring (MFTMM) and direct measuring of angular SV. It allows to provide both a search SV in the set point of space and his recognition, informative connection with SV, and also high stability of channel of AAOD in relation to blowing off autoaccompaniment SV due to applications of narrow-band filtration. Essence of work of the offered channel of AAOD is exposed. The got analytical expressions are presented for calculations.*

**Keywords:** channel of automatic accompaniment of aircrafts to direction.

## ВИСНОВКИ

Таким чином, запропоновано канал АСН з використанням МЧМВ і прямих вимірів про кутову швидкість КА, який забезпечує пошук КА, його розпізнавання на фоні інших об'єктів, високоточне вимірювання кутів азимута і міста та високу стійкість автосупроводження.

## Список літератури

1. Коломийцев О.В. Лазерна інформаційно-вимірвальна система з можливістю селекції та розпізнавання ЛА / О.В. Коломийцев // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України: Науково-технічний журнал. – Х.: ХУ ПС. – 2009. – № 2(2). – С. 91-93.
2. Полігонні лазерні та оптико-електронні вимірвальні засоби: Конспект лекцій. Частина II / С.В. Тюрін, І.С. Шостко, В.А. Романюк, В.В. Пономарьов, Р.В. Павлович. – Х.: ХВУ, 1998. – 174 с.
3. Деклараційний патент України на винахід №65099А, Україна, МПК G01 S 17/42, G01 S 17/66. Модернізований частотно-часовий метод вимірювання параметрів руху літальних апаратів / Коломийцев О.В. – № 2003054908; Заяв. 15.03.2004; Опубл. 15.03.2004; Бюл. № 3 – 4 с.
4. Патент на корисну модель, № 23215, Україна, МПК H04 Q 1/453. Селектор подовжніх мод для лазерної інформаційно-вимірвальної системи / О.В. Коломийцев, Г.В. Альошин, В.В. Баранник та ін. – № u200700070; Заяв. 02.01.2007; опубл. 10.05.2007; Бюл. № 6 – 6 с.
5. Коростелев А.А. Пространственно-временная теория радиосистем: Учеб. пособие для вузов / А.А. Коростелев. – М.: Радио и связь, 1987. – 320 с.
6. Альошин Г.В. Принцип підвищення стійкості кутового автосупроводження літальних апаратів у лазерних вимірвальних системах / Г.В. Альошин, О.В. Коломийцев, Ю.П. Рондін // Збірник наукових праць. – Х.: ХВУ, 2001. – Вип. 7(37). – С. 79-81.

Надійшла до редакції 5.10.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.